8Щ

УДК 621.382

Г.Ю. Щербакова[1]*, В.Н. Крылов*[1]*, В.Г. Абакумов*[2]
[1]Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина
[2]Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина
Galina_onpu@mail.ru

Оценка параметров распределения дефектов ИС с помощью помехоустойчивой кластеризации

Проведена оценка параметров распределения дефектов ИС с помощью помехоустойчивой кластеризации. Предложены метод и процедура оценки размеров блока среднекластерного распределения дефектов ИС с использованием мультистартового субградиентного итеративного метода кластеризации. Оценена помехоустойчивость метода кластеризации и его погрешность.

Развитие микроэлектроники требует обеспечить повышение технологического уровня и экономической эффективности полупроводникового производства. При этом возрастает актуальность формирования адекватных статистических распределений, позволяющих на стадии анализа технологического процесса производства прогнозировать распределение дефектов, которые вызывают ошибки функционирования схемы, и выход годных ИС. Поэтому при производстве устойчивых к наличию дефектов ИС более точное определение выхода годных определяет количество добавляемых к схеме избыточных элементов. Такой подход характерен для схем, состоящих из модулей, таких как элементы памяти и цифровой логики. Для прогноза выхода годных в настоящее время применяются различные варианты компаунд-распределений на основе обобщенного распределения Пуассона [1], [2]. Компаунд-распределение позволяет учитывать неоднородность распределения дефектов, приводящих к потере годных кристаллов в процессе производства ИС. Эти дефекты не распределены внутри пластины равномерно, а образуют кластеры [1]. В работах [1], [2] обоснован иерархический подход к оценке выхода годных ИС. Эта иерархия включает в себя крупнокластерное, среднекластерное и мелкокластерное распределения. Выбор вида распределения обусловлен соотношением размеров кластера, который характеризует неоднородность распределения дефектов в анализируемой области, и самой анализируемой области (модуль на полупроводниковой пластине, пластина, набор пластин (партия)). Понятие кластера в работах не определено [2]. В работе [1] введено понятие «блока», предполагается, что дефекты коррелированы между собой только внутри этих блоков, сами же блоки статистически не зависимы друг от друга. Выбор размеров блоков проводится с учетом типа ИС, особенностей производственных линий и процессов обработки пластин [1].

Ошибки оператора, сбои оборудования при измерении обусловливают зашумленность данных о дефектах при малом объеме их выборок. Методы, основанные на сравнении распределений этих данных, и распределения на их основе чувствительны к таким отклонениям (шуму) данных [1]. Влияние этих недостатков может быть уменьшено при применении помехоустойчивых процедур кластеризации. В связи с этим

представляется актуальным разработать метод, позволяющий формализовать выбор размера блока среднекластерного распределения оценки выхода годных, применяя помехоустойчивые методы кластеризации, принятые при распознавании образов [3].

При кластеризации данные разделяются на кластеры по признаку компактности, так, чтобы был оптимизирован функционал качества. Метод оптимизации выбирают в зависимости от особенностей формирования и свойств этого функционала качества, который может быть явно не известен, может обладать поверхностью многоэкстремальной, зашумленной, поскольку анализ производится по малым выборкам. Существующие методы кластеризации в этих условиях работают плохо. Для снижения влияния указанных выше недостатков в работе предлагается применить разработанный авторами помехоустойчивый субградиентный итеративный метод кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования [3].

Целью данной статьи является разработка метода, позволяющего формализовать расчет размеров блока среднекластерного распределения оценки выхода годных с применением помехоустойчивой кластеризации. Для достижения этой цели решены задачи анализа методов оценки выхода годных в микроэлектронике; разработки процедуры оценки выхода годных и размеров блока среднекластерного распределения с использованием субградиентного итеративного метода кластеризации; проведения экспериментальных исследований при оценке помехоустойчивости метода кластеризации.

При кластеризации используют иерархические и итеративные методы. Обе группы методов чувствительны к шуму данных [3], поэтому целесообразно разрабатывать методы, снижающие чувствительность к шуму при кластеризации.

Анализ методов оценки выхода годных ИС

При оценке выхода годных ИС используют компаунд-распределения дефектности [1], [2]. Дефекты, приводящие к потере годных при производстве ИС, не распределены внутри пластины равномерно, а образуют кластеры. Вероятность иметь в выборке k дефектных изделий определяется обобщенным отрицательным биномиальным распределением (компаунд-распределением) [2].

$$P(k) = \int_0^\infty \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} P(\lambda) d\lambda = \frac{\Gamma(k+a) b^a}{k! \Gamma(a)(1+b)^{k+a}},$$

где $a > 0, b > 0$; $\Gamma(a)$ – гамма-функция; a – параметр формы; b – параметр масштаба.

Выход годных (вероятность получить $k = 0$ дефектных модулей) в рамках компаунд-распределения Пуассона для крупнокластерного распределения, когда вся микросхема располагается внутри одного блока, определяется

$$Y = P(k=0) = \frac{1}{(1 + \frac{N\lambda_m}{\alpha_m})^{\alpha_m}},$$

где λ_m – среднее число дефектов на один модуль; α_m – параметр кластеризации; B – размер блока; N – размер микросхемы [1], [2].

Для среднекластерного распределения, когда $1 < B < N$, выход годных модулей

$$Y = P(k=0) = \frac{1}{(1 + \frac{B\lambda_m}{\alpha_m})^{\frac{N}{B}\alpha_m}}.$$

Для мелкокластерного распределения выход годных модулей

$$Y = P(k=0) = \frac{1}{(1+\frac{\lambda_m}{\alpha_m})^{N\alpha_m}}.$$

Среднекластерное распределение включает в себя крупнокластерное и мелкокластерное распределения, как предельные случаи [1]. Размер «блока» для мелкокластерного распределения равен одному модулю, для крупнокластерного распределения – равен всей площади пластины в модулях. Среднекластерное распределение применяют для микросхем большой площади (порядка квадратного дюйма), когда размер микросхемы больше размера кластера. В [1] введено понятие «блока» как единицы измерения размера кластера. Блоки статистически не зависимы друг от друга, внутри них дефекты распределены равномерно и коррелированы между собой, число дефектов в блоке имеет отрицательное биномиальное распределение [1]. Коэффициент кластеризации α постоянен внутри блока, но α возрастает, когда рассматриваемая область включает в себя несколько блоков [1], [2]. Для определения размеров блока разработан ряд методов. При определении размера блока согласно первому методу сначала оцениваются коэффициенты кластеризации α для каждого потенциального блока размером 1 × 1, 1 × 2, … I, J модулей. Из этих значений $\hat{\alpha}(I,J)$ формируется матрица. Далее проводится поиск наибольших (I,J) с $\hat{\alpha}(I,J)$ меньшим, чем $\hat{\alpha}(1,1)$. Это количество модулей принимается как размер блока [1]. Во втором методе оценки размеров блока размер блока определяется в два этапа (сначала количество модулей в длину B_1, потом – в ширину B_2). Пластина делится на блоки размером (I,J) модулей. Чтобы определить B_1 и B_2, формируются две матрицы с результатами проверки по критерию χ^2 статистической независимости между соседствующими вертикально (горизонтально) блоками. Индексы I и J, которые определяют выбор B_1 и B_2, определяют по первой строке (столбцу) матриц, в которых значения χ^2 ниже, чем в других. Однако в работе [1] те же авторы констатируют, что, даже применяя оба метода в сочетании, определить размер блока в случае малых выборок (малого количества исследуемых пластин) сложно. В работе [1] при определении параметров среднекластерной модели пластину при производстве ИС делят на модули, формируя из них «блоки» размером 1 × 1, 1 × 2, …, 2 × 3 и так далее модулей, определяют для каждого варианта параметры распределения α, λ, размер блока. Выбирают тот вариант, который по критерию Колмогорова дает наименьшее расхождение с результатами эксперимента.

Размер блока, который используют для определения коэффициента кластеризации, итеративно определяется заново для каждого вида производства ИС [1]. Это определение в пределах пластины предполагает перебор различных сочетаний количества и расположения модулей, входящих в блок. Все варианты распределений выхода годных ИС чувствительны к шумовым измерениям при контроле по малым выборкам [1]. Поэтому представляется актуальным предложить метод, позволяющий формализовать и автоматизировать процесс определения размеров блока для прогноза выхода годных ИС с помощью среднекластерного распределения на базе помехоустойчивого мультистартового субградиентного итеративного метода кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования [3].

Мультистартовый метод кластеризации

Задача кластеризации состоит в разбиении множества образов объектов на группы (кластеры) с учетом их сходства, которое определяют через расстояние. Расстояние в выбранном подходе к кластеризации рассчитывается от объектов к центру кластера. Координаты центров кластеров находятся одновременно с разбиением данных на кластеры. При отсутствии априорной информации о форме исследуемых кластеров и с учетом предполагаемой зашумленности выборки принимается функционал из группы родственных функционалу минимума дисперсии [3].

Для решения задач оптимизации при таких условиях авторами разработан помехоустойчивый субградиентный итеративный метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования [4]. Для повышения помехоустойчивости кластеризации на основе субградиентного итеративного метода оптимизации авторами разработан мультистартовый субградиентный итеративный метод кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования [3].

При итеративном подходе к кластеризации определяют вектор $c = c_{opt}$, который доставлял бы экстремальное значение $Q(\mathbf{x}, \mathbf{c})$ – функционалу вектора переменных $\mathbf{c}=(c_1,\ldots,c_N)$, зависящему от вектора случайных последовательностей $\mathbf{x}=(x_1,\ldots,x_M)$ [3]. По показам образов $x \in X$ определяют центры множеств X_k и их границы. При этом $Q(\mathbf{x}, c_1,\ldots, c_M) = \sum_{k=1}^{M}\varepsilon_k(\mathbf{x}, c_1,\ldots, c_M)F_k(\mathbf{x}, c_1,\ldots, c_M)$ – реализация функционала качества; $F_k(x, c_1,\ldots, c_M)$ – функция расстояния элементов $\mathbf{x}$ множества X от центров $\mathbf{c}_k$ кластеров X_k; $\varepsilon_k(\cdot)$ – характеристические функции

$$\varepsilon_k(x, c_1,\ldots, c_M) = \begin{cases} 1, \text{ когда } \mathbf{x} \in X_k, \\ 0, \text{ когда } \mathbf{x} \notin X_k. \end{cases}$$

Поисковый итеративный алгоритм для определения центров двух кластеров c_1^* и c_2^*

$$c_1[n] = c_1[n-1] - \gamma_1[n]\tilde{\nabla}_{c1+}Q(\mathbf{x}[n], c_1[n-1], c_2[n-1])$$
$$c_2[n] = c_2[n-1] - \gamma_2[n]\tilde{\nabla}_{c2+}Q(\mathbf{x}[n], c_1[n-1], c_2[n-1]),$$

где $\tilde{\nabla}_{c1+}Q(x[n], c_1[n-1], c_2[n-1])$, $\tilde{\nabla}_{c2+}Q(x[n], c_1[n-1], c_2[n-1])$ – оценки градиента реализации для первого и второго кластеров соответственно; $\gamma_k[n]$ – шаг; n – номер итерации; k – номер кластера.

Но, если в условиях помех оценка градиента проводится разностным методом, поисковый регулярный итеративный метод при кластеризации даст низкую помехоустойчивость.

Метод кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования заключается в следующем. После инициализации параметров метода, при кластеризации в каждый момент времени для каждого из i элементов взвешенной суммы с вейвлет-преобразованием определяют значение характеристических функций $\varepsilon_l(x, c_1, c_2), l = 1,2$, входящих в оценку субградиента. Для этого по методике [3] пары значений

$$c_1[n-1], c_2[n-1];\ c_1[n-1] \pm ie_1a[n], c_2[n-1];\ c_1[n-1], c_2[n-1] \pm ie_2a[n]\ \ (i = \overline{1, N})$$

при данном $x[n]$ подставляют в $f(x, c_1, c_2) = \|x[n]-c_1\|^2 - \|x[n]-c_2\|^2$. Здесь N – длина носителя вейвлет-функции; $a[n]$ – скаляр. Функция $f(x, c_1, c_2)$ равна нулю на границе

и имеет различные знаки в различных областях. Поэтому, если $f(x, c_1, c_2)$ отрицательна, $\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 0$, если положительна, $\varepsilon_1 = 0, \varepsilon_2 = 1$ [3].

В качестве базового использован градиентный метод поиска минимума [3], [4]. Исходные данные для его работы: начальные значения координаты минимума и шага $\gamma = 1$, коэффициент, обусловливающий изменение шага γ вблизи минимума $\beta = 0{,}5$, точность определения оценки градиента ε, количество итераций j. Процедура вычисления минимума при кластеризации включает [3]:

– вычисление оценки градиента;
– если значение оценки градиента меньше заданного значения точности ε – останов;
– вычисление величины шага: задается начальное значение величины шага $\gamma = 1$; вычисляется вспомогательное значение приращения функции **Д**, если приращение функции **Д** меньше нуля – $\gamma[n] = \gamma$ и переход к следующему этапу, иначе $\gamma[n] = \beta\gamma$ и переход к предыдущему этапу;
– расчет координаты минимума на n-ой итерации;
– $n = n + 1$ и переход к начальному этапу вычисления минимума при кластеризации.

При вычислении оценки градиента на каждой итерации на первом этапе вычисляется взвешенная сумма значений минимизируемого функционала $Q(x[n], c_1[n-1], c_2[n-1])$ с вейвлет-функцией Хаара. Это позволяет переместить поиск в район экстремума с погрешностью, определяемой асимметрией этого функционала. На втором этапе оценки градиента при кластеризации вычисляется взвешенная сумма минимизируемого функционала $Q(x[n], c_1[n-1], c_2[n-1])$ с гиперболической функцией $\Psi(i) = \dfrac{1}{\alpha x}$ при начальном масштабе $\alpha = 0{,}5$.

$$HWT(c[n]) = Q(x[n], c_1[n-1], c_2[n-1]) * \Psi(i),$$

где * – операция взвешенного суммирования.

Далее определяют приближение к значению координаты центра кластера по итеративному алгоритму в пространстве вейвлет-преобразования по схеме

$$c_1[n+1] = c_1[n] + \gamma[n]HWT(c[n]),$$

где $HWT(c[n])$ – взвешенная сумма с вейвлет-функцией в точке $c[n]$; $\gamma[n]$ – шаг.

Если найденная на этом этапе координата оптимума отличается от найденной на предыдущем этапе не более, чем на δ (заданную точность поиска координаты оптимума), поиск заканчивается. Для оценки субградиента использовано гиперболическое вейвлет-преобразование, полученное по следующей схеме. На каждом уровне поиска координаты оптимума значение масштаба α увеличивается в соответствии с $\alpha = \{0{,}5; 1; 2; 3; 4; 5\}$. Если условие окончания поиска координаты оптимума при значении величины $\alpha = 5$ не достигается, оценка субградиента производится разностным методом. После этого поиск заканчивается. При поиске координаты оптимума осуществляется переход от поиска с помощью вейвлета Хаара, с высокой помехоустойчивостью, вплоть (с ростом α) до поиска с помощью дифференциатора, способного дать максимальную точность. Далее проверяют условие точности определения центра кластера, если он достигнут – останов.

Оценка помехоустойчивости метода кластеризации проводилась с использованием функции $f(x) = x^2$ при значениях ее аргумента $x = 1, \ldots 80$. Помеха была распределена по нормальному закону с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением, изменявшимся в диапазоне от 0 до 5477. При отношении сигнал/шум по амплитуде 1,17

(помеха распределена по нормальному закону с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 5477, максимальное значение тестируемой функции $f(x) = 6400$) относительная погрешность определения минимума составила 8,32% [3], [4].

Оценка параметров среднекластерного распределения

Для оценки параметров среднекластерного распределения предлагается следующая процедура.

1. Разделение полупроводниковой пластины на модули равной площади [1].

2. Определение λ_m, α_m – количество дефектов на модуле, коэффициента кластеризации для модуля соответственно проводится по методике [2]. Тогда

$$\hat{\lambda}_m = \overline{X} = \frac{1}{S \cdot W} \sum_{i=1}^{S \cdot W} X_i ,$$

где $\hat{\lambda}_m$ – оценка λ_m; S – количество пластин; W – количество модулей на пластине; X_i – число дефектов на модуле i $(i = 1,\ldots,S \cdot W)$; $\overline{X}$ – среднее число дефектов на модуле.

Оценка α_m проводится с учетом того, что число дефектов X имеет отрицательное биномиальное распределение с параметрами λ_m, α_m. Оценка дисперсии будет

$$\hat{V}(X) = \frac{1}{S \cdot W} \sum_{i=1}^{S \cdot W} X_i^2 - \overline{X}^2 .$$

Оценка коэффициента кластеризации для модуля

$$\hat{\alpha}_m = \frac{\overline{X}^2}{\hat{V}(X) - \overline{X}} .$$

Коэффициент кластеризации блока определяется как $\hat{\alpha}_b = \hat{\alpha}_m$ [1].

3. Определение количества, центра, диаметра кластеров с заданной точностью θ с помощью предложенного метода кластеризации.

4. Определение максимального целого числа модулей, входящих в кластер, для каждого варианта кластеров, определенных в пункте 3.

5. Формирование вариационного ряда площадей кластеров, выраженных в модулях. Эти значения (I, J) принимаются как значения размеров блоков для первой итерации.

6. Определение размеров блока.

6.1. По методике [1] последовательно

– формируется матрица оценок коэффициентов кластеризации α для потенциальных размеров блока от 1×1 и до $I \times J$ модулей; отыскивается наибольшее (I, J), для которого $\hat{\alpha}(I, J)$ меньше, чем $\hat{\alpha}(1,1)$, это сочетание количества модулей и принимается как размер блока;

– применяется второй метод оценки размеров блока; размер блока этим методом определяется в два этапа (количество модулей в длину и в ширину соответственно B_1 и B_2). Исследуемая пластина делится на блоки размером (I, J) модулей. Чтобы определить B_1 и B_2, формируются две матрицы, содержащие результат проверки по критерию χ^2 статистической независимости между соседними блоками. Индексы I и J, которые определяют выбор B_1 и B_2, определяются по первой строке и столбцу соответствующих матриц, в которых значения χ^2 значительно ниже, чем в других.

6.2. Последовательно, начиная с минимального (I, J), сравниваются значения (I, J) из вариационного ряда, полученного в пунктах 5 и 6.1. При совпадении результатов с заданной точностью φ, принимается минимальный размер блока, для последующего сравнения с результатами экспериментальной оценки выхода годных.

Если оценки размеров блока в пунктах 5 и 6.1 отличаются более чем на φ, рекомендуется повысить точность кластеризации (уменьшить θ) и повторить расчеты по пунктам 3 – 6. Если различаются все три оценки размеров блока по пунктам 5 и 6.1, выбирают тот вариант размера блока, который при сравнении с результатами экспериментальной оценки выхода годных дает меньшую ошибку.

7. Определяют количество дефектов блока $\lambda_b = B \cdot \lambda_m$. Здесь $B = B_1 \cdot B_2$ – размер блока.

В работе решены задачи анализа методов оценки выхода годных в микроэлектронике, разработки метода и процедуры оценки размеров блока среднекластерного распределения дефектов ИС с использованием мультистартового субградиентного итеративного метода кластеризации; проведены экспериментальные исследования по оценке помехоустойчивости метода кластеризации и снижения его погрешности. Относительная погрешность определения минимума при кластеризации для тестовой функции при отношении сигнал/шум по амплитуде 1,17 составила 8,32%. Эти результаты позволяют рекомендовать разработанный метод определения размера блока среднекластерного распределения в процессе статистического анализа годных ИС при высоком уровне помех и при малых объемах выборок.

Литература

1. Koren I. A Statistical Steady of Defect Maps of Large Area VLSI IC's / I. Koren, Z. Koren, C.H. Stapper // IEEE Transaction on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 1994. – Vol. 2, № 2. – P. 249-256.
2. Богданов Ю.И. Статистические модели управления дефектностью и выходом годных в микроэлектронике / Ю.И. Богданов, Н.А. Богданова, В.Л. Дшхунян // Микроэлектроника. – 2003. – Т. 32, № 1. – С. 62-76.
3. Щербакова Г.Ю. Адаптивная кластеризация в пространстве вейвлет-преобразования / Г.Ю. Щербакова, В.Н. Крылов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 6(40). – С. 123-128.
4. Крилов В.М. Субградієнтний ітеративний метод оптимізації в просторі вейвлет-перетворення / В.М. Крилов, Г.Ю. Щербакова // Збірн. наук. праць Військового інституту Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. – 2008. – Вип. 12. – С. 56-60.

Г.Ю. Щербакова, В.М. Крилов, В.Г. Абакумов

Оцінка параметрів розподілу дефектів ІС з допомогою завадостійкої кластеризації

Проведено оцінку параметрів розподілу дефектів ІС з допомогою завадостійкої кластеризації. Запропоновані метод і процедура оцінки розмірів блоку середньокластерного розподілу дефектів ІС з використанням мультистартового субградієнтного ітеративного методу кластеризації. Проведена оцінка завадостійкості методу кластеризації та його похибки.

G.Yu. Shcherbakova, V.N. Krylov, V.G. Abakumov

IC Defect Distribution Parameters Evaluation with Noise Stability Clustering

The IC defect distribution parameters evaluation with noise stability clustering was carryied out. The IC medium clustering defect distribution's block size evaluation method and its implementation procedure was proposed. In that procedure multi starting sub gradient iterative clustering method is used. The experimental investigation for this clustering method noise immunity increasing and own error decreasing estimation was carried out.

Статья поступила в редакцию 03.07.2009.